

## 이중유벽의 유효성에 관한 해석

한동기<sup>(1)</sup>, 이정묵<sup>(2)</sup>

## Analysis of Effectiveness of Tandem Oil Fences

by

Dong Gi Han<sup>(1)</sup> and Choung Mook Lee<sup>(2)</sup>

### 요 약

조류 중에 설치한 이중 유벽의 유효성을 검증하기 위하여 유벽 전후 및 유벽사이에서의 유적(oil droplet)의 거동을 실험적 및 수치적으로 연구하였다. 이 연구에는 단일 유벽의 경우 유벽의 유연성이 포유성능에 미치는 영향도 포함되었다. 실험은 유적의 밀도와 근사한 구형의 고체입자가 전방 유벽의 상류 한 지점에서 방류되었을 때 그 궤적을 추적하는 것이 내용이었다. 입자는 방류되었을 때 유동장의 상태에 따라 자유표면으로 부상하거나, 유벽에 충돌 또는 유벽하로 빠져나가는 현상을 나타내게 된다. 본 논문에는 이러한 유적의 이동 경위를 해석함으로써, 이러한 유적의 유적이 운동을 시작하는 영역이 어딘가에 따라 전방유벽하로 기름이 누출될 것인지 아닌지를 판단할 수 있는 방법과 전후 유벽의 흘수의 차 그리고 수심이 이중유벽의 포유성능에 미치는 영향을 해석할 수 있는 방법을 제시하였다.

### Abstract

To assess the oil-containment effectiveness of tandem oil fences placed in currents, the movement of oil droplets in the fore and aft region of the fences is investigated by experimental and numerical methods. The effect of the flexibility of the fence skirt of single fence on the fence effectiveness is also investigated. Laboratory experiment is conducted to trace the path of a spherical solid particle of equivalent density to an oil droplet which was released in a uniform stream ahead of a model oil fence. Depending upon the releasing position and the flow condition there, it was observed that the particle floated up to the free surface, collided with the fence, or escaped below the fence. By analyzing the droplet trajectories, a numerical method is developed to predict the region ahead of the fore fence where an oil droplet initiating its motion eventually escapes beneath the fence. The effect of the relative sizes of the drafts of the fore and aft fences, the fence separation, and the bottom depth of the sea bed on the effectiveness of tandem fences is investigated using the numerically obtained trajectories of oil droplets.

Keywords: Tandem Oil Fences, Droplet Tracking, Water-Depth Effect

1) 포항공과대학교 첨단유체공학 연구센터

2) 정희원, 포항공과대학교 첨단유체공학 연구센터, cmlee@postech.edu

## 1. 서 론

해양에서의 기름의 유출과 확산에 따른 오염 피해를 최소화하기 위해서 다양한 방제 장비가 사용된다. 유류는 유출 즉시 해면에 확산되기 때문에 유출시 우선 확산을 방지시키는 게 매우 중요하며 이를 위해 유벽(oil barrier; boom), 표면활성제(surfactant chemicals) 등을 사용한다. 유벽은 일종의 부상 장애물로서 유출유의 확산을 막아 한정된 지역으로 좁히고 유막의 두께를 두껍게 하여 수거에 용이하도록 하는 기능을 가진다.

일반적으로 유벽은 해양 누유 사고 시에 흔히 사용되는 유용성이 큰 방제 장비이나 그 보유 성능은 조류와 파랑에 의하여 크게 저하된다(Lee & Kang [1994, 1995], Kang [1996], 강, 이 및 한 [1997], 송, 현 및 홍[1998]). 실제로 1knot 이상의 조류 속도나 1m 이상의 파고에서는 그 효용성이 급격히 떨어지는 것으로 알려져 있다(Cormack [1983], Fanelop [1983], 유, 이 및 김[1999]). 기름은 파랑이 심한 해상 상태에서 유벽 위로 유출되기도 하나 이 보다 크게 문제가 되는 것은 조류에 의하여 기름이 유벽 아래로 유출되는 것이라고 할 수 있다.

유벽 밑으로 기름이 빠져나가는 현상은 크게 유적 누출(entrainment failure)과 배수 누출(drainage failure)의 두 가지로 구분한다. 유벽 전방에 가두어진 기름층과 물의 계면에 작용하는 전단력은 전방 유속이 증가함에 따라 경계면의 불안정성을 증가시키고 계면파를 발생시키는데 이 때 유속이 임계 속도 이상이 되면 계면전단에 생기는 수두파(head wave) 정점 부근의 압력 구배가 큰 부분이나 계면상의 전단력이 경계면 장력보다 큰 곳에서 계면이 부분적으로 깨지면서 다양한 형태의 유적(oil droplet)이 계면에서 떨어져 나오게 되며 떨어져 나온 유적이 조류에 의해 이송되어 유벽 밑으로 유출되는데 이를 유적 누출이라고 한다. 한편 조류나 바람의 속도가 증가함에 따라 기름층이 유벽 근처에서 누적되어 유벽의 흘수(draft)보다 두꺼워지면 기름이 유벽 뒤로 연속된 유체로 빠져나가게 되는데 이를 배수 누출이라고 한다. 유적 누출은 통상적으로 배수 누출보다 낮은 조류속도에서 발생하며 유벽의 깊이에 거의 무관하게 일어나는 현상으로서 해상

에 기름을 가두는데 많은 문제를 발생시킨다(Lee & Kang [1994]).

임의의 유벽의 사용 한계를 규명하여 방제 작업을 효율화하고, 유벽 형상의 개선이나 적절한 예인 방법 등을 통하여 조류 중 흘수의 감소를 최소화 하기 위해서는 조류 중에서의 유벽의 거동을 예측할 수 있는 방법이 확립되어야 한다. Kang & Lee [1996]는 유벽 주위의 압력 분포를 포텐셜 유동을 해석하여 비교적 정확하게 계산할 수 있는 방법을 제시한 바 있다. 한 [1999]은 Kang & Lee [1996]의 이론 해석 방법에 의한 유연한 유벽의 거동 해석법의 신뢰성을 실험을 통하여 검증하였고 유벽의 유연성으로 인한 변형에 의한 보유성능의 변화를 비교 규명하였다.

위에서 언급하였듯이 유벽의 유용성은 해양환경조건에 의하여 많은 제한을 받는다. 이를 극복하기 위한 시도가 이중 유벽의 제안이었다(Cormack [1983], Delvigne [1987], Lo [1996], Lee, Kang and Cho [1998]). 이중 유벽은 전방 유벽 밑으로 누출되는 유적이 유벽후방으로 부상하는 경향에 착안하여 후방 유벽을 설치함으로써 재누출을 방지하자는 데 그 목적이 있다.

이중 유벽의 유효성 검토는 이미 Lee et al. [1998, 1999] 그리고 도, 현, 최 및 홍[2000] 에서 발표된 바 있다. 본 연구에서는 이 검토를 보다 더 충실히 하기 위한 목적으로 추가적인 실험과 수치 계산을 수행하였다. 실험으로는 회류수조에서 유벽 전방으로부터 기름이 유출되는 상황을 구현하여 강체구의 궤적 측정 실험을 수행하고 그 결과를 계산 결과와 비교 고찰함으로써 입자의 거동을 지배하는 무차원 수에 대한 모델 조건과 실제 조건 사이의 상사성 문제와 계산 방법이 갖는 타당성 및 적용 한계를 검토하였다.

추가로 수행된 수치계산으로는 이중 유벽에 있어서의 전부 유벽과 후부 유벽의 흘수 변화에 따른 이중 유벽의 보유 성능 변화와 이중 유벽이 제한된 수심에 놓였을 때 갖게 되는 보유 성능의 변화에 관하여 규명하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 유적의 궤적 추적

#### 2.1.1 계산방법

본 연구에서는 유벽 전방에서 균일한 유속  $U$ 를

가진 흐름이 홀수가 D인 이중 유벽을 지날 때 주위의 유동장을 2차원, 비압축성, 정상 유동으로 가정하여 해석하였다. 좌표계는 우수좌표계로 원점을 정수면과 전부유벽이 교차하는 점에 두고 정 방향의 x축은 정수면을 따라 유동의 방향으로 그리고 정의 y축은 상 방향으로 택하였다. 지배 방정식은 연속 방정식과 Navier-Stokes 방정식으로서 위의 가정에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (2.1)$$

$$\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nabla\{(\nu + \nu_t)\nabla \mathbf{u}\}$$

여기에서  $\mathbf{u}$ 는 유동의 속도 벡터,  $p$ 는 동압력,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\nu$ 는 물의 동점성 계수,  $\nu_t$ 는 물의 난류 와점도이다.

지배 방정식에 대한 경계 조건으로서 자유 표면과 바닥 지점에는 유체 속도의 수직 성분이 영(零)인 조건을, 상류 쪽에는 균일한 유속조건을, 원방 하류 쪽에는 x방향의 유체 속도의 변화가 영( $\partial \mathbf{u} / \partial x = 0$ )인 조건을 주어 계산하였다. 계산 영역은  $-15D \leq x \leq 25D$  그리고  $-15D \leq y \leq 0$ 을 택하였다. 계산에는 CFX-F3D release 4.1의 상용 코드(Harwell Lab. [1994])를 사용하였다. 여기서  $k-\epsilon$  난류 모델 계산에는 Jones & Launder [1972]서 제시한 실험 상수들을 사용하였다.

### 2.1.2 입자 거동 해석 방법

주어진 유동장 하에서 임의의 입자의 궤적을 구하기 위해서는 입자의 거동을 지배하는 운동 방정식이 필요하다. 입자의 운동에 의해 발생하는 점성 유체에 의한 기억 효과를 무시하면 유체 내에서 운동하는 입자에 대하여 아래와 같은 운동 방정식이 성립한다(Maxey et al. [1983], Berlemont et al. [1990]).

$$\begin{aligned} \rho_o \frac{d\mathbf{u}_d}{dt} = & -\frac{\rho C_D A_e}{2V} |\mathbf{u}_r| \mathbf{u}_r + (\rho_o - \rho) \mathbf{g} \\ & - \rho C_A \frac{d\mathbf{u}_r}{dt} + \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} \end{aligned} \quad (2.2)$$

위에서  $\mathbf{u}_d$ 는 입자의 속도 벡터,  $\mathbf{u}$ 는 유체의 속도 벡터,  $\mathbf{u}_r (= \mathbf{u}_d - \mathbf{u})$ 은 입자와 유체의 상대속도 벡터,  $\mathbf{g} = (0, -g, 0)$ 는 중력 가속도 벡터,  $\rho_o$ 는 입자의 밀도,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $d_e (= (6V/\pi)^{1/3})$ 는 입자와 체적이 같은 구의 직경이고,  $V$  ( $V = \pi d_e^3/6$ )는 입자의 체적,  $A_e$  ( $A_e = \pi d_e^2/4$ )는 입자의 단면적,  $t$ 는 시간,  $C_D$  ( $= \text{Drag}/(0.5\rho \mathbf{u}_r^2 A_e)$ )와  $C_A$  ( $= \text{Added Mass}/(\rho V)$ )는 각각 입자의 항력 계수와 부가질량 계수를 나타낸다. 그리고  $\frac{d}{dt}$ 는 시간도함수 그리고  $\frac{D}{Dt}$ 는 물질도함수(material derivative)이다.

식 (2.2)에서 오른쪽의 첫 번째와 세 번째 항은 각각 유체 저항력과 부가 질량을 나타내며, 두 번째 항은 물과 입자의 밀도 차에 의한 부력을, 네 번째 항은 입자가 차지하는 영역의 유체 입자가 갖는 관성력을 나타낸다. (2.2)식의  $C_A$ 와  $C_D$  계수는 Clift et al. [1978]에서 주어지는 값들을 사용하였다. (2.2)식의 해는 Lagrangian 궤적추적법과 4차계의 Runge-Kutta 방법으로 계산하였다.

### 2.1.3 실험 장치 및 방법

입자 궤적에 대한 수치 해석 결과의 정확성을 검증하기 위한 실험은 Lee et al. [1998]에 의하여 수행된 바 있다. 그러나 이 실험에서는 소형 회류수조( $0.3\text{m}[\text{W}] \times 0.25\text{m}[\text{H}] \times 1.42\text{m}[\text{L}]$ )의 한계 때문에 유벽 전방으로부터 입자를 출발시켜 유벽 뒤로 빠져나가게 되는 경우를 구현 할 수 없었다. 따라서 실제상황에서와 같은 유벽의 누출을 모사할 수 있는 궤적을 측정하지 못했다.

본 실험에서는 Lee et al [1998]에서 사용되었던 소형 회류수조보다는 큰 회류수조( $1\text{m} \times 1\text{m} \times 4.5\text{m}$ )에서 수행되었다. 본 연구는 조류 중에서의 유벽의 변형으로 인한 기름의 유출 특성을 고찰하는 부분도 포함되는 것으로서, 소형수조에서는 불가능했었던 입자를 수직 유벽 및 유연한 유벽의 전방으로부터 출발 시켜 유벽 뒤로 빠져나가게 하기 위한 실험 조건을 구현하고 이때의 입자의 궤적을 측정하여 계산에 의한 결과 및 소형수조의 실험 결과와 비교 고찰하였다.

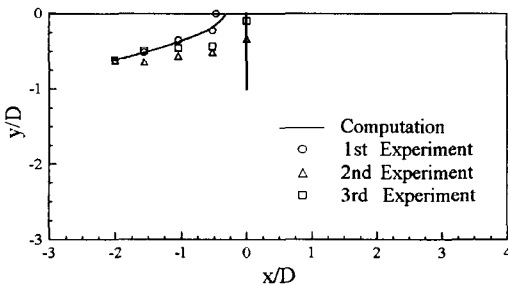
입자의 궤적을 측정하기 위한 방법으로서 대형 회류수조 시험부의 측면에 격자를 설치하고 CCD 카메라로 촬영하는 방법을 택하였다. 궤적 측정

을 위한 입자로는 파라핀(밀도:  $900 \text{ kg/m}^3$ )으로 만든 강체구(rigid sphere)를 사용하였으며 강체구를 유벽 전방의 입자의 지점에서 출발시키기 위해서 입자 출발 장치를 제작하여 사용하였다. 입자의 방출방법은 직경 10mm의 관에 입자를 삽입후 이를 가는 붓으로 가볍게 밀어내는 방식을 택하였다. 이 때 입자의 방출속도는 무시할 수 있다고 판단하였다.

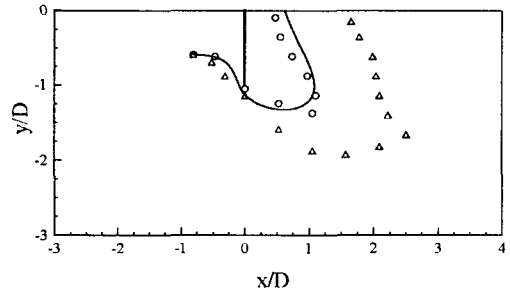
2.1.4 결과 및 토의

수직 유벽과 변형된 유벽 전방에서 출발시킨 입자의 궤적 측정값과 이에 따른 계산 결과 중 일부를 Fig. 1과 2에 각각 나타내었다. 소형수조에서는 부력 대 저항력비가 대형수조의 경우보다는 큰 값이어서 전부 유벽 전방에서 방류된 입자는 부력에 의해 자유표면으로 부상하기 때문에 유벽하로 누출할 수가 없었다. 따라서 입자궤적의 계산치 및 실험치의 비교는 입자가 유벽하로 누출되는 경우의 비교를 할 수 없었다. 전체적으로 볼 때 본 실험에서의 결과는 소형회류수조에서의 경우에 비해 계산 결과와 비교적 큰 차이를 나타내며 특히 입자가 유벽 끝단을 지난 이후의 궤적들은 반복성을 보이지 않는 것을 볼 수 있었다.

이러한 실험 결과의 원인으로서 소형회류수조에 비해, 증가된 Re 수에 따른 모형 유벽 주위의 유동 특성 변화, 상대적인 입자부력 대 저항력 비의 감소(두 경우 입자 크기는 동일), 입자 방출을 위한 수중에 삽입된 관에 의한 유동교란, 그리고 유벽 끝단에서의 vortex shedding 및 와류에 의한 영향 등을 고려할 수 있다.

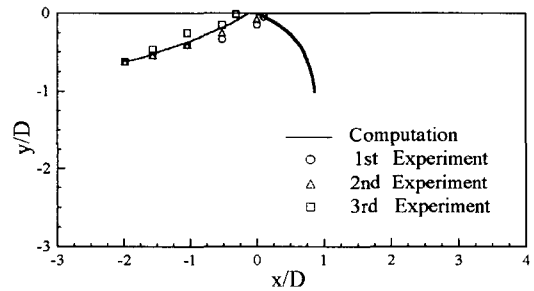


(a)  $(x_0, y_0)/D = (-2.0, -0.6)$

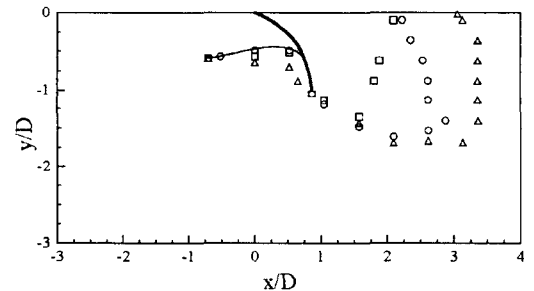


(b)  $(x_0, y_0)/D = (-0.7, -0.6)$

Fig. 1 Trajectories of beads around the vertical model fence for various initial points at  $Fr = 0.292, Re = 53100$



(a)  $(x_0, y_0)/D = (-2.0, -0.6)$



(b)  $(x_0, y_0)/D = (-0.7, -0.6)$

Fig. 2 Trajectories of beads around the deflected model fence for various initial points at  $Fr = 0.292, Re = 53100$

한편 입자의 운동 방정식(2.2)에서 부가질량계수( $C_A$ )는 일정하다고 가정할 때 입자의 운동을 결정하는 중요한 인자는 부력과 항력이라는 것

을, 자세한 항 대 항의 값의 비교(한[1999], P. 14-19 참조) 및 각항의 값을 변경시켰을 때의 얻어지는 궤적의 비교로 알 수 있었다. 잘 알려져 있는 것과 같이 (2.2)식의 셋째 및 넷째 항과 같은 관성력 항들은 운동초기 짧은 시간동안만 영향을 미친다는 것을 확인했었다. 두 수조의 조건에 따른 결과를 종합하여 볼 때 Froude수가 0.22일 때 소형 수조의 경우에는 부력항대 저항력항의 비가 0.67 : 1 인 반면 대형 수조의 경우는 Froude수가 0.29일 때 이 비가 0.13<sup>(3)</sup> : 1 이었다(한 [1999]). 따라서 대형회류수조의 경우는 입자가 부력에 의한 영향보다는 유동에 의하여 받게 되는 영향이 소형회류수조에서 보다 훨씬 더 크게 나타나는 것으로 판단 할 수있다.

유벽 끝단으로부터 어느 정도 멀리 떨어진 지점에서 입자를 출발시켰을 때 나타나는 계산 결과와 실험 결과 사이의 오차에 대한 한 원인은 우선 입자방출시 초기조건의 불 균일성 때문이라고 생각할 수 있다. 이는 주위유동의 확란을 최소화시키면서 수중에 입자를 방출시키는 방법의 한계성으로 불가피한 일이었다. 한편 입자가 유벽에 접근하고 또 그 끝단을 통과하게 되면 점차로 유벽 끝단 부근의 비정상적이며 주기적인 와류에 의한 영향을 받게 되므로 그 궤적들이 불규칙적으로 형성되는 것을 볼 수 있었다.

그러나 계산은 유동의 정상조건을 가정하고 행해지므로 유벽하단에서 생성되는 와류의 모사는 할 수 없다는 것이 결점이다. 물론 Navier-stokes 방정식의 수치 해를 직접수치 모사법(Direct Numerical Simulation)으로 수행하고 이렇게 얻어진 유동장에서의 입자궤적추적법을 사용할 수 있는 게 바람직한 일이겠지만, 아직은 DNS에 의해 계산할 수 있는 Reynolds수가 작은 수( $Re < 10^3$ )이기 때문에 현재로서는 불가능한 일이다. 실제적으로는 거의 주기적인 와류가 유벽 하단에서 생성됨으로써 이러한 와류의 영향권에 있는 유역에서의 입자의 궤적은 정상유동의 가정 하에서와 같은 일정한 궤적은 안 나타나지만 시간 평균의 값은 존재할 것이고 또 이러한 시간평균치는 계산 결과와 많이 틀리지는 않으리라는 가정을 할 수 있다고 생각된다. 다시 말해서 본 실험에서의 조건과 같이 입자가 비정상적인 유동

에 의하여 지배적인 영향을 받는 경우에 있어서도, 계산으로부터 입자의 시간 평균적인 궤적을 얻을 수 있으며, 이 결과에 기초한 유벽 보유 성능 해석에 있어서의 유용성은 인정할 수 있다고 본다.

### 2.1.5 수직 유벽과 변형된 유벽에 대한 유적 누출 특성 비교

실제 해상 조건에서 수직 유벽과 변형된 유벽의 보유 성능을 유적 누출의 측면에서 고찰해 보기 위하여 계산을 수행하였다. 유벽의 홀수( $D$ )는 수직 유벽과 변형된 유벽의 경우 모두 0.5m로 설정하였다. 변형된 유벽의 경우  $\alpha (= \rho U^2 / (2T))$ ;  $T$ 는 ballast weight)가 1.0일 때 이론에 의해 계산된 변형 곡선을 사용하였다. 전방유속( $U$ )은 0.5knot(=0.257m/s)와 1knot의 두 경우를 택하였다.

Fig. 3은 0.5knot의 조류 속도에서 유벽 끝단으로부터 밑으로  $D/4$ 만큼 떨어진 지점으로부터 직경이 5mm 및 10mm 인 액적을 출발시켰을 때의 궤적 계산 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 수직 유벽과 변형된 유벽 끝단 부근에서 출발시킨 액적의 궤적에는 거의 차이가 없음을 볼 수 있다.

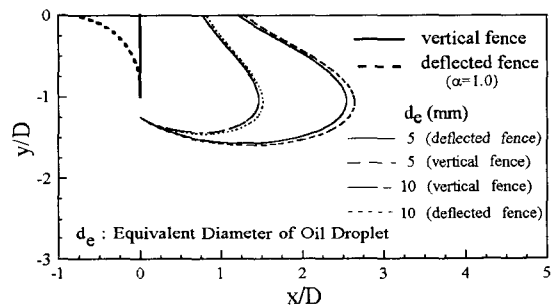


Fig. 3 Trajectories of oil droplets of different diameters behind vertical and deflected fences of  $\alpha=1.0$  in a uniform current for the droplet release point at  $y=-1.25D$  at  $Fr=0.116$

(3) 실제로는  $u_r/U < 1$  이나 여기서는  $u_r = U$  이라고 가정했을 때를 의미한다.

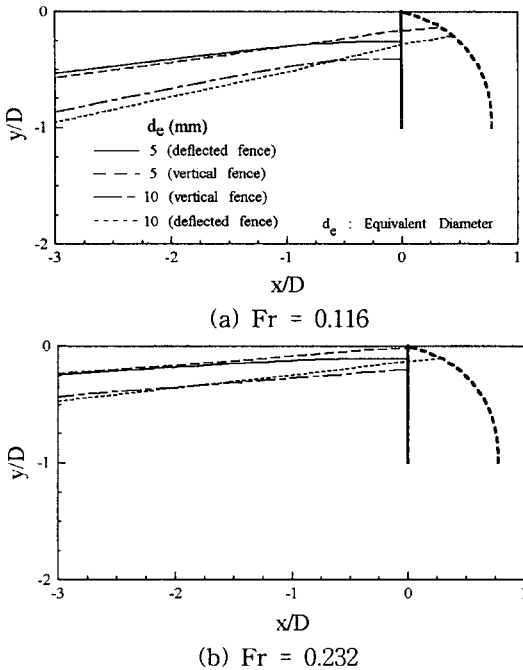


Fig. 4 Leakage lines of vertical and deflected fences for different oil droplet diameters and current speed

Fig. 4는 주어진 두 조류 속도에서 수직 유벽과 변형된 유벽에 있어서의 각각 직경 5mm와 10mm의 액적에 대한 누출선(leakage line)을 나타낸 것이다. 여기서 누출선이라 함은 입자의 유출을 가능케 하는 유벽 전방에서의 입자의 초기 위치에 대한 경계선으로 정의한다. 즉 누출선을 경계로 하여 그 상부 영역에서 출발시킨 입자는 유벽 밑으로 빠져나가지 않고 유벽 전방에 다시 가두어 지며 그 하부영역으로부터 출발시킨 입자는 유벽 밑으로 빠져나가게 된다. 이는 주어진 유동장과 액적에 대하여 초기 위치를 다양하게 변화시키면서 그 궤적을 모두 계산하여 봄으로써 얻을 수 있다.

Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 주어진 조류 속도에서 액적의 크기가 작아질수록, 또 같은 크기의 액적에 대하여 속도가 증가할수록 누출선은 자유 표면에 가까운 쪽으로 이동한다. 이는 다시 말해서 입자의 크기가 작아질수록 또 전방 유속의 세기가 커질수록 입자가 유벽 뒤로 유출될 수 있는 영역은 넓어지는 것을 의미한다. 그

림에서 볼 수 있는 바와 같이 누출선은 대체적으로 유벽 전방의 먼 지점으로부터 양의 기울기를 갖는 직선의 형태를 띤다. 액적은 유벽으로부터 멀어질수록 균일한 유동장 안에서 움직이며 따라서 입자는 중단 속도에서 일정하게 움직이게 되는 것으로 해석할 수 있다. 한편 입자가 유벽 전방의 근접한 영역에 들어오면 입자는 유벽에 의하여 교란된 유동의 영향을 받으므로 유벽 전방에서의 유동의 특성이 입자의 궤적에 큰 영향을 미치게 된다.

Fig. 4에서 같은 크기의 조류 속도 및 직경을 가진 액적에 대하여 수직 유벽과 변형된 유벽에서의 누출선을 살펴보면, 유벽 전방의 충분히 떨어진 영역에서는 수직 유벽과 변형된 유벽의 누출선에 큰 차이가 없는 반면 유벽 전방의 근접한 영역으로 갈수록 누출선에 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 그림에서 유연한 유벽의 누출선이 수직유벽의 누출선에 비하여 자유 표면 쪽으로 더 가깝게 형성되는 것을 볼 수 있는데, 이는 이와 같은 유벽 전방의 근접 영역에서 유연한 유벽이 수직 유벽보다 입자를 유출시킬 확률이 더 높다는 것을 의미한다.

일반적으로 유벽 전방에 가두어진 기름은 조류의 속도가 증가함에 따라 그 경계면에서 점성 응력의 영향을 받아 유벽 쪽으로 누적되는데 이 때 기름층의 형상은 유벽에 가까운 쪽으로 그 두께가 증가하는 형상을 가진다. 한편 앞에서 살펴본 바와 같이 누출선은 대체로 이러한 기름의 형상과는 역으로 형성되므로 유벽에서의 기름의 유출은 바로 유벽 전방의 근접 영역에서 쉽게 일어나게 될 것이다. 이러한 관점에서 수직 유벽과 변형된 유벽의 유벽 근접 영역에서 생기는 누출선의 차이는 유벽의 보유 성능에 큰 영향을 끼치게 된다고 할 수 있다. 수직 유벽의 누출선은 양의 방향의 기울기로 형성되다가 유벽에 가까워지면서 자유표면에 평행하게 되는 데 반하여 변형된 유벽의 누출선은 유벽에 가까워지면서 계속 직선적인 기울기를 유지하면서 형성됨을 알 수 있다. 따라서 조류에 의하여 유벽 쪽으로 형성된 기름층이 누출선의 바깥으로 나가게 되는 현상은 유연한 유벽의 경우가 수직 유벽의 경우보다 더 넓은 영역에서 일어나리라고 생각할 수 있다. 이와 같은 사실을 바탕으로 변형된 유벽은 같은 홀수의 수직 유벽에 비하여 유적 누출의 측면에서 그 보유 성능에 저하를 가져올 수 있다는 결론을

얻을 수 있다.

## 2.2 이중유벽에 있어서의 유벽홀수 및 수심의 영향

유벽의 홀수는 보유성능에 직접적인 영향을 준다. 이중 유벽의 경우 전후부의 홀수의 차가 보유성능에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 전부와 후부 유벽의 홀수를 각각  $D_1$ ,  $D_2$ 로 했을 때의 3개의 조합 즉,  $(D_1, D_2) = (D, D)$ ,  $(D/2, D)$ ,  $(D, D/2)$ 에 대하여 계산을 수행하였다. 여기에 추가되는 변수로서 유적의 크기, 조류속도 및 두 유벽사이의 간격을 고려할 수 있다. 이러한 결과 중 대표적인 예를 Fig. 5에 나타내었다.

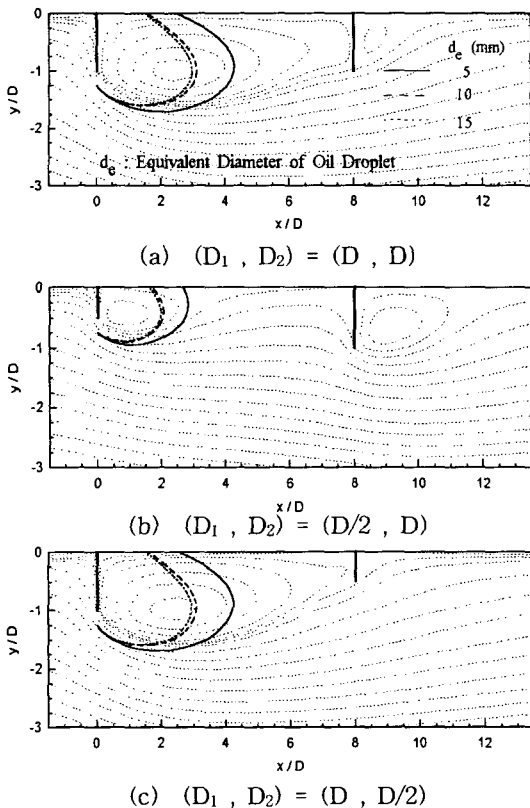


Fig. 5 Computed streamlines and trajectories of oil droplets around the tandem fences of separation distance ( $l_f$ ) =  $8D$  with different fore and rear drafts ( $D_1, D_2$ ) at  $Fr = 0.232$

이 그림은  $D=0.75m$ , 조류속도  $1knot$  그리고 유벽간격  $8D$ 에 대한 유선의 모양 및 유벽 끝단으로부터 출발시킨 입자의 궤적에 대한 계산 결과이다. 전방유벽홀수가 후방유벽홀수의 반인 경우는 (Fig. 5(b)) 전방유벽의 홀수의 감소도 기름의 누출 가능성이 증가하는데 유선의 모양은 두 유벽사이에 일단 갇혀 있던 유적이 후방유벽 밑으로의 제2차 누출이 가능할 수 있음을 보여준다. 전후방유벽의 홀수가 동일한 경우 (Fig. 5(a))와 후방유벽이 전방유벽의 반인 경우 (Fig. 5(c))는 거의 비슷한 유선의 양상을 보이지만 기름의 제2차 누출의 방지 면으로는 유벽홀수가 동일할 때가 더 유리할 것이라는 판단을 내릴 수 있다. 따라서 보유능력의 측면에서 유리한 홀수의 비에 대한 순위를 택한다면 본 연구의 종합적인 결과로서  $(D, D)$ ,  $(D, D/2)$ ,  $(D/2, D)$ 의 순이 될 것으로 판단된다.

이중 유벽은 해안 수역 중 반드시 보호가 필요한 경우에 그 중요성이 인식 될 것이다. 해안으로 접근하면서 일반적으로 수심이 얕아지는 경우가 많을 것이다. 이런 경우 유벽의 홀수 대 수심의 비가 보유성능에 직접 영향을 미칠 것임은 쉽게 예측할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이점을 검토하기 위해서 전후유벽이 동일한 홀수를 가질 때  $D=0.75m$ , 수심( $H$ )이  $2D$ 와  $15D$ 구간이고, 유벽간격이  $8D$ , 그리고 조류속도가  $1knot$ 와  $2knot$ 인 경우, 유적이 전방유벽 끝단에서 수직하방으로  $0.25D$  지점에서 방출되었을 때를 대상으로 계산을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 6에 표시된 바와 같다. 이 그림에 나타나는 유적의 궤적곡선으로 보아 유적이 자유표면에 재 부착하는 거리는 유적의 크기가 작을수록, 수심이 작을수록 그리고 유속이 증가할수록 증가한다는 판단을 내릴 수 있다. 재 부착거리가 증가할수록 이중유벽의 보유성능은 감소할 수 있는 가능성이 크다고 할 수 있다.

따라서 수심이 작은 수역에서 이중유벽을 설치할 때 유벽의 홀수를 너무 크게 할 경우 오히려 역효과를 낼 수 있다는 가능성을 본 연구결과를 통하여 알 수 있었다.

## 3. 결론

본 연구에서는 이전에 수행되었던 이중유벽의

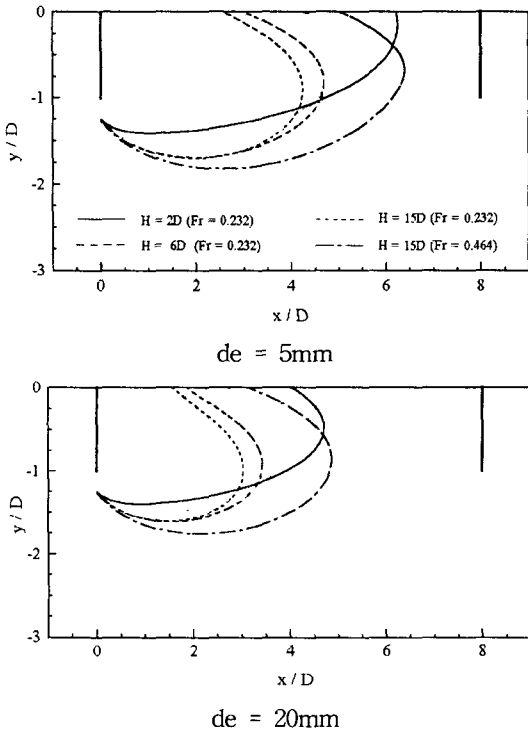


Fig. 6 Trajectories of oil droplets of two different equivalent diameters ( $d_e$ ) with tandem fences of separation distance ( $l_f$ ) = 8D for various depths (H) at  $Fr = 0.232$  and 0.464 for the droplet release point  $y = -1.25D$

유효성 조사에서 다루지 않았던 i) 유적이 전부유벽 전방에서 운동을 시작했을 때의 유적궤적 추적, ii) 유연한 재질로 인한 유벽의 굴곡이 생겼을 때 수직 유벽과 비교한 보유성능의 검토, iii) 전후유벽의 홀수의 차가 보유성능에 미치는 영향, 그리고 iv) 수심이 작은 경우 유벽 홀수와 수심의 비가 보유성능에 미치는 영향을 조사하였다. 연구의 결과를 요약하면

1. 전방유벽의 상류에서 운동이 시작된 유적의 궤적은 같은 평균유속하에서도 실험결과에 많은 변화가 있음을 알았다. 이는 평균유속은 동일할 지라도 한 지점에서의 유속의 시간에 따른 변화 및 유적 방출시 초기 방출속도의 약간의 차이 등으로 말미암아 궤적이 많이 달라질 수 있기 때문인 것으로 판단하였다.

2. 유적누출경계선(이 선 이하에서 유적이 방출되면 전방유벽 밑으로 누출됨)은 본 연구에서 처음 도출한 것으로서 유벽성능 평가에 좋은 지침이 되리라 생각한다. 이 지침에 의하면 유벽 스킵트가 굴곡이 되었을 때, 유효홀수의 감소에 의한 것 뿐만 아니라 유적누출경계선도 유벽전방에서 자유수면에 더 접근한다는 사실로 인하여 유벽의 보유성능이 저하됨을 알 수 있었다.
3. 전후부유벽의 홀수는 동일할 때가 보유성능이 좋다는 것을 알 수 있었다. 천수해역에서의 이중유벽의 홀수 대 수심의 비가 증가한다고 반드시 보유성능이 증가하지 아니함을 알 수 있었다.
4. 유벽간의 간격은 전 연구에서(Lee et al. [1998]) 밝혀진 8D~10D가 가장 적절하다는 결론을 재확인하였다.

## 후 기

본 연구는 과학재단의 연구비 지원으로 포항공대부설 우수연구센터인 첨단유체공학연구센터에서 수행되었다. 과학재단과 포항공과대학교에 감사 를 표한다.

## 참고문헌

- [1] 강관형, 이정목, 1996, “몽뚝한 물체에 작용하는 압력의 효율적인 계산방법과 조류중에서의 유연한 벽의 변형,” 대한조선학회 논문집, 제 33권, 4호, 22-31
- [2] 강관형, 이정목, 한동기, 1997, “조류 중 변형으로 인한 유벽의 보유성능 저하,” 대한조선학회 추계연구발표회 논문집, 357-360.
- [3] 도덕희, 현범수, 최성환 및 홍성대, 2000, “이중유벽 사이에 가두어진 기름층의 거동 특성,” 한국해양환경공학회지, 제 3권, 제 1호, 25-34
- [4] 송무석, 현범수, 서정천, “유벽에 갇힌 기름층의 조류중 손실에 관한 연구,” 한국해양환경공학회지, 제 1권, 제 2호, 40-51
- [5] 유정석, 이문진, 김진환, 1999, “오일붐의 실험역 성능평가 기법 개발,” 한국해양환경공학회지, 제 2권, 제 1호, 49-62.
- [6] 이정목, 강관형, 1998, “조류중에서의 유벽의



- 보유성능 해석," 한국해양공학회 회지, 제 1권, 제 1호, 29-38
- [7] 한동기, 1999, "조류 중 유벽의 보유성능에 대한 연구," 석사학위논문, 포항공과대학교.
- [8] Berlemont, A., Desjonqueres, P. and Gouesbet, G., 1990, "Particle Lagrangian Simulation in Turbulent Flows," *Int'l J. Multiphase Flow*, Vol. 16, No. 1, 19-34.
- [9] Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, "Bubbles, Drops, and Particles," Academic Press.
- [10] Cormack, D., 1983, "Response to Oil and Chemical Marine Pollution," *Applied Science Publishers*, New York.
- [11] Delvigne, G. A. L., 1987, "Laboratory Experiments on Oil Spill Protection of a Water Intake," *Oil in Fresh Water: Chemistry, Biology, Countermeasure Technology*, (Eds. Vandermeulen, J. H., and Hruday, S. E.), Pergamon Press, 446-458.
- [12] Fannelop, T. K., 1983, "Loss Rates and Operational Limits for Booms used as Oil Barrier," *Applied Ocean Research*, vol. 5, 80-92.
- [13] Harwell Laboratory, 1994, CFDS-FLOW3D Release 3.3: User Manual, Oxfordshire OX11 0RA, United Kingdom.
- [14] Jones, W. P. and Launder, B. E., 1972, "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence," *Int'l J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, 301-314.
- [15] Kang, K. H., 1996, "Theoretical and Experimental Investigations of Motion and Containment of Contaminated Free Surface Layer," Ph. D. Thesis, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea.
- [16] Kang, K. H. and Lee, C. M., 1999, "Behavior of Oil-Water Interface between Tandem Fences," *J. KOSMEE*, Vol. 2, No. 2, 70-77.
- [17] Lee, C. M. and Kang, K. H., 1994, "Investigations on Containment-Capability and Dynamic Response of an Oil Fence in waves," *Annual Report of Advanced Fluids Engineering Research Center*, Series AFR-93-F01, 3-42.
- [18] Lee, C. M. and Kang, K. H., 1995, "Development of Optimum Oil Fences in Currents and Waves," *Annual Report of Advanced Fluids Engineering Research Center*, Series AFR-94-FGH, 7-41.
- [19] Lee, C. M., Kang, K. H. and Cho, N. S., 1998, "Trapping of Leaked Oil with Tandem Oil Fences with Lagrangian Analysis of Oil Droplet Motion," *J. OMAE, ASME Trans.*, Vol. 120, 50-58.
- [20] Lo Jen-Men, 1996, "Laboratory Investigation of Single Floating Booms and Series of Booms in the Prevention of Oil Slick and Jellyfish Movement," *Ocean Engineering*, Vol. 23, 519-531.
- [21] Maxey, M. R. and Riley, J. J., 1983, "Equation of Motion for a Small Rigid Sphere in a Nonuniform Flow," *Phys. of Fluids*, Vol. 26, 883-889.